

渦を「見る」と速度変動を「測る」

永田 拓* 福島千晴* 森 友紀*

“Observation of Vortex Patterns” versus “Measurement of Velocity Fluctuations”

Hiroshi NAGATA, Chiharu FUKUSHIMA and Tomonori MORI
Gifu University

ABSTRACT

Two conventional methods, i.e., observation and measurement, have been applied to investigate the vortex flows. The relation between the observation and the measurement are discussed. Two methods are complementary to each other in a full understanding of the unsteady vortex flows, since the observation of vortex patterns is useful to know the spatial variation of the flow at an instant and the measurement of velocity fluctuation is useful to know the temporal variation of the flow at a local point. In order to know both spatial and temporal variation of vortex flows, a new method was developed to measure the velocity field by means of hydrogen bubble techniques. By use of the method the velocity field in Karman vortex streets were obtained and the patterns of sectional streamlines and contours of vorticity were determined in the region of the near of a cylinder.

Key Words: vortex, visualization, hydrogen bubble techniques, sectional streamlines, vorticity, Karman vortex street

1. はしがき

「渦」は、流体運動を理解するための基本的な構造として、古くから注目されてきた。「渦」は、今日の流体力学の成果を超えて複雑で、渦運動の解明は、乱流の秩序運動からカオスに致る広範な流れの根幹をなし、今なお新しい課題である。

「渦」を知るための手法として、渦を見る「可視化実験」と熱線等による速度変動の「測定」がある。すなわち、「渦」を含む流れを、「ボタン」として観察する手法と、「波動」として測定する手法である。それぞれの手法による膨大な研究の蓄積があり、渦に関する「ボタン」と「波動」の情報は相補的ではあるが、両者の関係は明確ではない。

本研究では、「渦を見ること」と「速度変化を測ること」

を対比し、両者の関連について考察し、「渦を測る」新しい可視化実験の方法を模索した。その一つの試みとして、水素気泡法によって、気泡発生細線を通過する非定常流の速度を測定し、この流れのSectional Streamlinesを描き、速度場の時間変化を明らかにする方法を導いた。この方法をカルマン渦列に適用し、この方法が、従来しばしば強調される可視化画像の誤認（古い煙のパラドックス¹⁾）を回避し、時間的空間的に変化する渦構造を定量的に把握する方法として有効であることを示した。

2. 渦を「見る」と「測る」

現象を科学的に理解するためには、現象を科学言語で描写する必要がある。すなわち現象を「考える」とか「思う」という様式で理解し、それを物理量を用いて表現する²⁾。「渦」を速度変動として熱線等で測る場合は、その結果は波動現象を特定する物理量を用いて記述できる。しかし、「渦」を画像として見る行為は、日常用語で表現される

* 岐阜大学工学部

「見聞触臭味」の知覚の一つであり、画像には、速度変動では表現し難い種々の情報が含まれている。また、熱線等の速度変動情報は「局所的空間変動」である。したがって両者の知覚を敢えて対比すれば、速度変動（波）は音と同様に聴覚に依り、渦は視覚に依る。いずれの知覚も、必ずしも科学言語で直截に表現できない多様な情報を、人は直感的に理解する。従来から強調されている「渦」の可視化画像の解釈の難しさは、時間情報が欠如していることに加えて、「渦」が日常用語であって、渦のイメージを表現するに十分な科学用語（物理量）が不足していること、さらに、パタン認識の推論には、論理的必然に欠け、繰り返しの習慣と連想に依存する帰納的推論の多義性³⁾を伴うことに起因する。古い煙のパラドックス¹⁾や、みにくいアヒルの子の定理³⁾は、その必然である。

「渦」は科学用語として熟していないので「渦」の普遍的定義はない。渦度は流体要素の回転角速度と対応しているが、ある広がりをもった領域の流体の回転速度とは対応しない⁴⁾。Perryら⁵⁾のcritical point についての研究が示すように、渦度の集中領域が渦核になるか否かは、その周辺の数値勾配テンソルに依存する。Berdahrら⁶⁾は、この考えを旋回流に拡張し、渦や旋回領域を、共通の一つの軸のまわりに流体粒子が回転する領域と定義し、これらの領域は観察座標系の並進速度に依存しない速度勾配テンソルの特性によって確定されることを示した。

速度勾配テンソルに注目するPerry⁵⁾やBerdahr⁶⁾の観点は、「渦」と日常言われる多くの流れに対する直感的理解を科学的な理解に導くものと思われる。一般に渦流れは非定常であるので、時間的に変化する速度勾配テンソルの空間変化を知る必要がある。このためには速度場の測定が必要であるので、熱線等による速度変動の測定が有効である

ように思われる。しかし、定点測定を基本とする熱線等の出力信号は局所的時間変動であるので、空間的な速度勾配を知ることは容易ではない。これを知るためには、テーラー仮説のもとに多点同時測定を必要とし、高価な測定システムを要する。

3. 可視化実験によって「渦を測る」

渦を「見る」と「測る」の関係をまとめると図1のようになる。図中実線で示すように、従来の可視化実験では、時間を凍結した流れパタン（局時的空間変化）の観察や測定を行ってきた。すなわち、時間情報は離散的であるが、空間変化については、情報の圧縮を必要とする十分すぎる情報がある。

本研究では、熱線等の測定に対比しうる非定常渦についての定量的知見を、可視化実験によって得る方法を考えた。図1中破線で示すように、熱線等の測定に習ってテーラー仮説のもとに可視化領域を限定し、この領域を通過する渦の局所的な構造を水素気泡法によって知る以下の方法を導いた。

流れと直交して気泡発生細線を設置し、これから気泡をパルス的に発生させる。図2に示すように、気泡がN回発生するごとに、照明光源のストロボを同期発光させる。こうして可視化した流れを「流しカメラ」の手法で写真撮影する。すなわち、カメラのシャッターを開放にして、フィルムを巻き取りながら水素気泡が示すタイムラインを撮影した。図3は、円柱背後の渦列にこの方法を適用した写真の一例(N=9)である。ストロボの閃光時間が短いので、フィルムは動いているが、明確なタイムラインが可視化されている。さらに、隣接するタイムラインの気泡の発生状況から流れの方向がわかるので、写真から流跡の長さと同時間の関係から気泡発生細線を通過する流れの速度ベクトルが測定できる。測定値の時間分解能は、ストロボの発光間隔 Δt_s に依存するが、この写真では、円柱からの渦放出周期の1/12である。

4. 実験の結果と考察

4.1 Sectional Streamline

上述の方法によって、ストロボの発光間隔 Δt_s の平均速

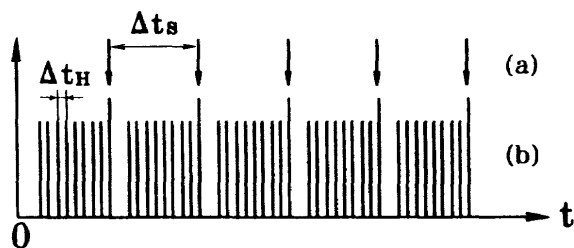


図2 水素気泡の発生とストロボの発光時期の同期
(a) ストロボ, (b) 水素気泡発生

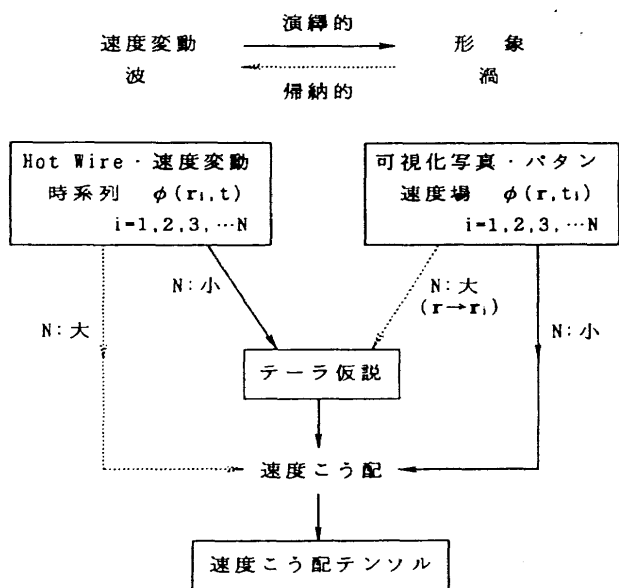


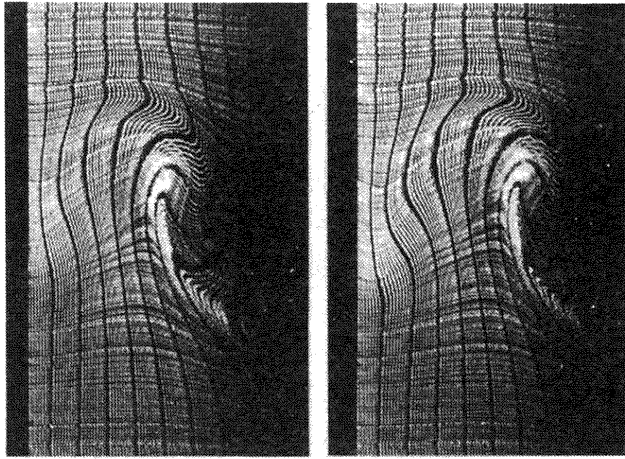
図1 渦を「見る」と「測る」の関係

度 \bar{v} の y 方向 (流れを横切る方向) 分布が、 Δt_s の時間間隔で求まる。 \bar{v} を局所的な速度 \mathbf{v} (u, v) と見なし、テラ一仮説のもとに $\Delta x = u_v \Delta t_s$ (u_v : 渦の移流速度, x : 円柱の中心から主流方向の距離) により Δt_s を Δx に置き換えて、 \mathbf{v} の

時間変化を x 方向の変化に読み替えた。そして \mathbf{v} の格子点 (x_i, y_i) 上の \mathbf{v} の値をコンピュータに取り込み、スプライン関数によってデータの平滑化を行い⁷⁾、 \mathbf{v} の空間分布を格子点上の速度 $v_{i,j}$ として格納する。測定した速度場をパターン表示するために、格子点上の速度 $v_{i,j}$ から、格子が構成する区画内で速度が接線となる曲線、すなわち Sectional Streamline⁸⁾ を求めた。

図4は、円柱表面を発色電極とする電解沈殿法によって、円柱背後の流れを可視化したものである。この写真に見られるように、渦列の構造は、円柱からの距離によって変化する。この変化を定量的に把握するために、気泡発生細線の設置位置 x_H/d (x_H : 円柱中心からの距離) を、3.0, 5.0, 及び 7.0 (図4中矢印) に変えて、上述の方法により求めた Sectional Streamline を図5-I に示す。これらのパターンは、 x_H/d 一定の位置を通過する渦流れを、渦の移流速度で動く座標系で観察した渦構造を示す。図中の実線は、渦中心とよどみ点を結んだ直線を示し、渦構造が x_H/d によって変化する状況を良く示している。この渦構造は、前掲の図4に見られる色素で可視化された流脈が示す渦構造と良く対応しており、本方法の適用によって、可視化写真の解釈が一義的に確定する。この適用例は、可視化写真と渦構造との対応が良い場合であるが、可視化画像の誤認を警告する流れとしても有名な、「Hamaの猫目流線の流れ⁹⁾」に対しても本方法を適用すれば、「古い煙のパラドックス」に落ち込むことはない。

図6は、上述の図5-I(c)の流れについて、観察座標系の速度 u_0 を変えた場合の Sectional Streamlines を示す。 u_0 の変化によって渦中心及びよどみ点の位置が変化することが分かる。



(a) $t = t_1$ (b) $t = t_1 + \Delta t_s$

図3 可視化写真の一例, $Re=121$, $x_H/d=5.0$
($\Delta t_s = 0.26s$, $\Delta t_H = \Delta t_s / 10$)

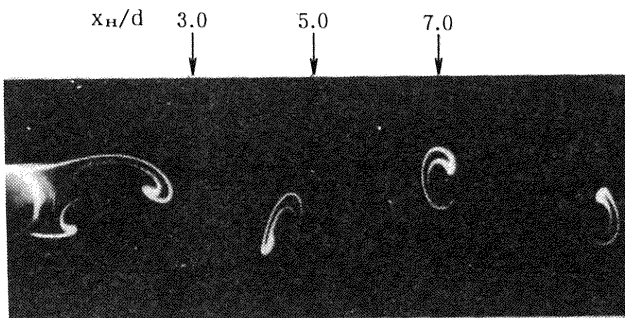
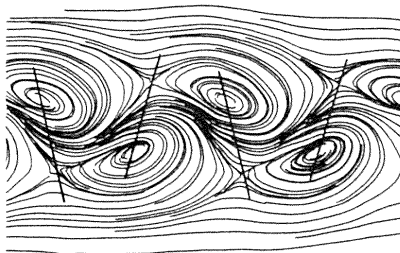
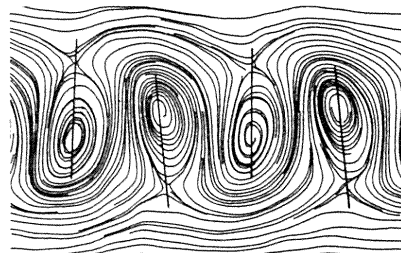


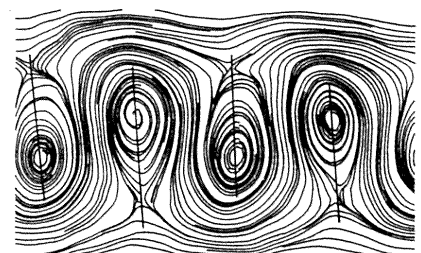
図4 円柱背後の流れ (電解沈殿法, $Re = 123$)



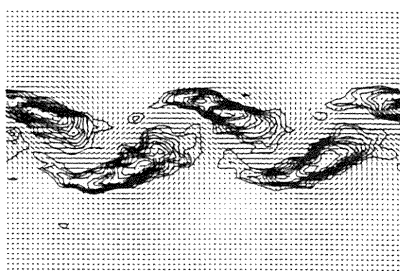
I (a) $x_H/d = 3.0$



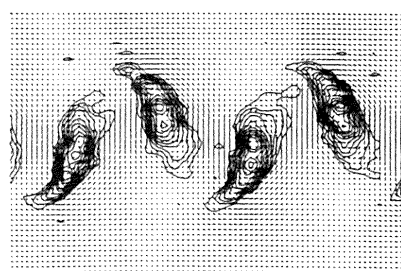
I (b) $x_H/d = 5.0$



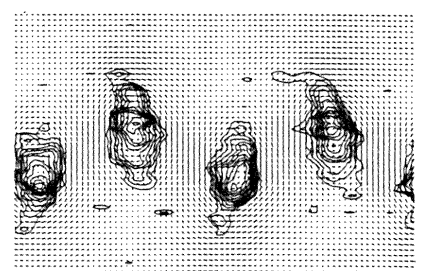
I (c) $x_H/d = 7.0$



II (a) $x_H/d = 3.0$



II (b) $x_H/d = 5.0$



II (c) $x_H/d = 7.0$

図5 円柱背後の流れ, $Re=120$, (I) Sectional Streamlines, (II) 等渦度線

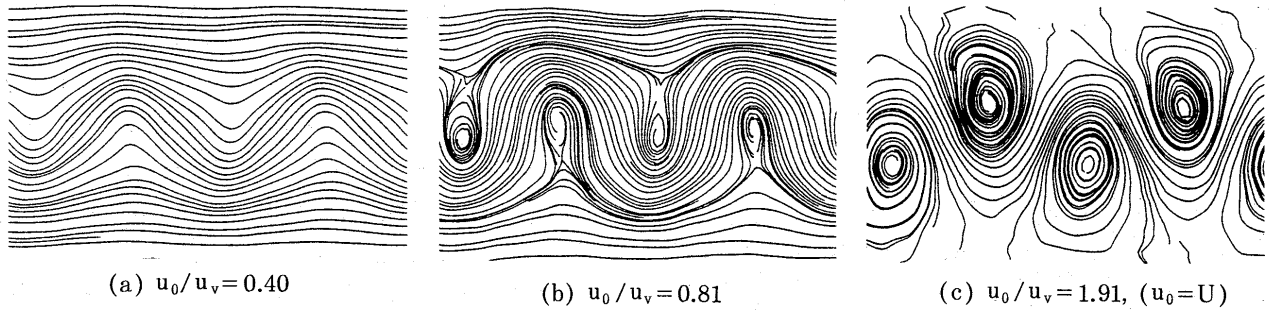


図6 観察座標の速度 u_0 を変えた場合の Sectional Streamlines, $Re=120$, $x_H/d=7.0$

4.2 渦度と速度勾配テンソル

前述のように、本方法では格子点上の速度についてスプライン補間するので、格子点上の速度勾配は確定する。観察座標系の並進速度に対して不変である速度勾配に関する知見は、渦現象のより本質的な理解に導くと考えられる。流れが二次元的であれば、本方法により u, v の x, y 微分からなる速度勾配テンソルは確定する。

図5-IIは、格子点上の速度勾配から求めた渦度 $\zeta = v_x - u_y$ の等渦度線を、速度ベクトルと重ね合わせて示す。この等渦度線の形状は、円柱表面から溶出した色素の分布状況から推定される渦度分布と良く対応している。渦度分布と同様に、速度勾配テンソルも、渦度分布と同様に求めることができるので、本方法によれば観察座標系に依存しない渦の構造が明らかにできると考えられる。

5. 結 言

1. 写真等のパターン情報は、視覚によって直感的に理解される局時的空間変化である。流れの可視化写真から渦構造を知る推論は、帰納的であり論理的必然に欠け、帰納的推論の多義性が含まれる。この多義性を避けるためには、熱線等で測定される局所的時間変化量との対比が必要である。
2. 時間的・空間的に変化する渦構造を定量的・一義的に知るために、水素気泡法によって、気泡発生細線を通過する流速の時間変化(局所的時間変化)を測定し、こ

の部分の Sectional Streamline を描く方法を導き、円柱近くのカルマン渦列にこの方法を適用した。この方法は、従来の可視化実験と比べると、空間変化の把握を一部放棄しているが、熱線等の測定値と対比できる速度場の時間変化が測定できる利点を有し、観察座標系によって変化する流線パタンの視覚化、及び観察座標系の速度に依存しない速度勾配テンソル(含渦度)の測定が可能であることが実証された。

文 献

- 1) 佐藤 浩, 文部省科学研究費特定研究「乱流現象の解明と制御」中津川集会 (1984)
- 2) 大森荘蔵, 物と心, (1976), 東大出版
- 3) 渡辺 慧, 認識とパターン, (1978), 岩波新書
- 4) Truesdel, C., The Kinematics of Vorticity, (1954), Indiana Univ. Press
- 5) Perry, A.E. and Chong. M.S., Ann. Rev. Fluid Mech., 19 (1987), 125
- 6) Berdahr, C.H. and Thompson. D.S., AIAA J., 31-1 (1993), 97
- 7) 吉村和美, 高山文雄, パソコンによるスプライン関数, (1988), 東京電機大学出版
- 8) Bisset, D.K., Antonia, R.A. and Browne, L.W.B., J. Fluid Mech., 218 (1990), 431
- 9) Hama, F.R., Phys. Fluids, 5-6 (1962), 644